

Capítulo 6

## **Biorremediación artesanal en suelos contaminados por la producción de cocaína en una vereda de Nariño, Colombia**

*Luis Andrés Rodríguez Coral, María Lorcy Rosero Mora,  
Oscar Jardey Suarez*

Rodríguez Coral, L. A., Rosero Mora, M. L., & Suarez, O. J. (2026). Biorremediación artesanal en suelos contaminados por la producción de cocaína en una vereda de Nariño, Colombia. En F. J. Manjarrés Arias. (Coord). *El espectro de las ingenierías. Investigaciones situadas en contextos regionales (Volumen I)*. (pp. 114-135). Religación Press. <http://doi.org/10.46652/religacionpress.401.c865>



# 06

## *Biorremediación artesanal en suelos contaminados por la producción de cocaína en una vereda de Nariño, Colombia*

### **Resumen**

Este capítulo describe el diseño de un protocolo de biorremediación artesanal de suelos contaminados por la producción de clorhidrato de cocaína, en una vereda de Nariño, Colombia. El texto se sitúa en el marco de la crisis ambiental generada por los cultivos ilícitos, causando deforestación, pérdida de biodiversidad, acidificación de suelos y contaminación química en regiones de alta vulnerabilidad socioeconómica. El propósito es integrar el conocimiento científico sobre biorremediación, con los saberes ancestrales de la comunidad, para desarrollar una solución sostenible y de bajo costo. La investigación con enfoque metodológico mixto y experimental muestra un estudio de laboratorio en el que se contaminaron muestras de suelo fértil, con sustancias químicas representativas del proceso de producción de cocaína. Posteriormente, se hace la caracterización fisicoquímica de los suelos y el aislamiento e identificación de los morfotipos bacterianos en muestras contaminadas y no contaminadas. Paralelamente, se aplicaron encuestas y entrevistas a campesinos que se dedicaban al cultivo de hoja de coca y líderes comunitarios, para recopilar información sobre sus percepciones ambientales, prácticas tradicionales y disposición a participar en proyectos de restauración. Los resultados constituyen la base para la construcción participativa de un protocolo de restauración, que utiliza recursos locales como microorganismos nativos, estiércol, cabello humano y plantas con capacidad fitorremediadora, con el objetivo de devolver la fertilidad al suelo y promover la transición hacia prácticas agrícolas sostenibles.

Palabras clave: Biorremediación artesanal; contaminación de suelos; clorhidrato de cocaína; cultivos alternativos; desarrollo rural sostenible.

## Introducción

La expansión de la coca en Colombia genera una crisis ambiental devastadora, especialmente en zonas biodiversas y vulnerables. Gran parte de estos cultivos persiste en territorios críticos como Norte de Santander, Cauca y Putumayo. Nariño se destaca de forma alarmante en este panorama, pues, al concentrar la mayor área sembrada del país con casi 60.000 hectáreas, enfrenta un impacto socioambiental profundo que se ha mantenido durante la última década (UNODC, 2024).

La expansión de la coca, por su procesamiento, genera un grave deterioro ecosistémico que afecta la biodiversidad, la salud humana y el bienestar social (Fu et al., 2017). Este fenómeno impulsa la deforestación de bosques primarios para ampliar la frontera agrícola. Además, el procesamiento del alcaloide en laboratorios rústicos vierte químicos como ácido sulfúrico, acetona y gasolina directamente al entorno (Figura 1), según la Policía Nacional (2014), estas sustancias provocan acidificación del suelo, pérdida de microorganismos esenciales y alteración de ciclos biogeoquímicos, además de la acumulación de metales pesados, consolidando una crisis ambiental profunda en las regiones afectadas.



Figura 1. Residuos químicos tras el procesamiento de clorhidrato de cocaína. Nota: Policía Nacional (2014).

En la vereda del estudio, la dependencia histórica de la coca ante el abandono estatal ha degradado profundamente el entorno. Los campesinos testifican la pérdida de fertilidad del suelo y una contaminación química persistente. Como señala un testimonio, aunque la coca superaba económicamente a otros cultivos, “trajo la guerra y daños ambientales a nuestras puertas” (International Crisis Group, 2021). Esta realidad refleja que el sustento ilícito no garantiza bienestar, sino que sacrifica el ecosistema y la seguridad local. Restaurar estos suelos mediante ingeniería convencional resulta inviable por sus altos costos y complejidad técnica, siendo inaccesible para comunidades rurales y gobiernos con recursos limitados.

Frente a este panorama, emerge la necesidad de explorar alternativas de restauración viables, sostenibles y de bajo costo que puedan ser apropiadas por las propias comunidades (Sharma et al., 2023). La biorremediación, definida como el uso de organismos vivos —principalmente microorganismos y plantas— para degradar, transformar o eliminar contaminantes del ambiente, se presenta como una opción prometedora para recuperar suelos afectados (Vidali, 2001).

Para garantizar su efectividad en contextos rurales de alta complejidad, la biorremediación debe trascender el laboratorio e integrarse con los saberes locales. Este capítulo, producto de una investigación de maestría en Ingeniería Ambiental, describe el diseño de un protocolo de restauración sostenible. La propuesta fundamenta su valor en la convergencia entre la identificación científica de bacterias nativas con potencial degradador y el conocimiento ancestral de la comunidad de la vereda en estudio, sobre el “suelo vivo”. Así, se busca establecer las bases para una transición hacia prácticas agrícolas sostenibles en el territorio.

***Contexto de la problemática: el impacto del narcotráfico en el recurso suelo.*** El cultivo y procesamiento de cocaína representan una actividad de alto impacto ambiental que comienza con la tala y quema de bosques nativos. Estas acciones provocan la pérdida inmediata de biodiversidad, la fragmentación de hábitats y la liberación de dióxido de

carbono, lo que contribuye directamente al cambio climático (Policía Nacional, 2014). Una vez establecido el cultivo, el uso intensivo de herbicidas y plaguicidas para el control de plagas agrava la situación, pues sus residuos se infiltran en suelos y acuíferos. Al respecto, Guevara (2003), retoma las advertencias sobre los efectos de químicos como el DDT, los cuales se acumulan en la cadena trófica —desde plantas hasta animales superiores—, generando daños persistentes en los ecosistemas.

El punto crítico de la contaminación ocurre durante la transformación de la hoja de coca en clorhidrato de cocaína dentro de laboratorios clandestinos o “cocinas”. En este proceso se emplean insumos de alta peligrosidad: gasolina y keroseno para la extracción, seguidos de ácidos sulfúrico y clorhídrico, permanganato de potasio y acetona para la purificación. Tras su uso, estos químicos son arrojados sin tratamiento al entorno, convirtiendo el suelo en un depósito de xenobióticos. De acuerdo con la Policía Nacional de Colombia (2014), se estima que estos vertimientos, de los diferentes enclaves (Figura 2), alcanzan al menos 3,5 toneladas de residuos químicos por hectárea cultivada al año, consolidando un impacto ambiental severo y persistente en los ecosistemas afectados.

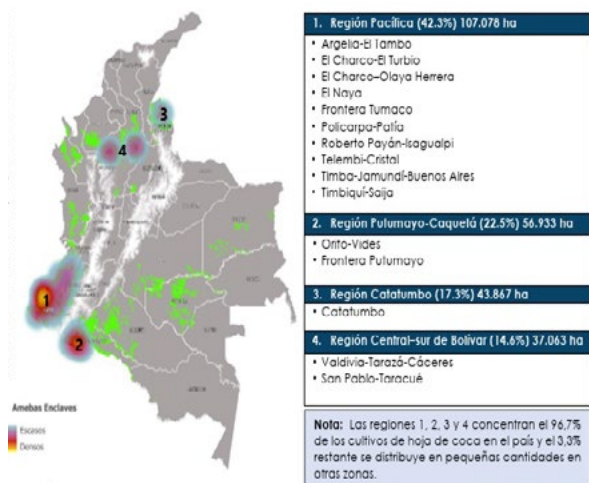


Figura 2. Regiones de Colombia con distribución territorial según la permanencia de los 15 enclaves.

Nota: Observatorio Antinarcóticos y Grupo Detección-ARINT/DIRAN, SIMCI.

El impacto en los espacios ecológicos protegidos, como los Parques Nacionales Naturales (PNN), es contundente. La Policía Nacional (2014), reporta que 17 de las 59 áreas del sistema nacional —casi el 30 %— se ven afectadas por la deforestación causada por los cultivos de coca, muchas de las cuales se hace por quema (Figura 3). Estos efectos no se limitan a la pérdida de cobertura boscosa, sino que incluyen procesos de contaminación severos que alteran las propiedades del suelo. En este sentido, la presión sobre el ambiente no se circunscribe únicamente al área del cultivo, sino que se expande hacia todo el ecosistema circundante (Bernex, 2009).

*Un enfoque integrador: la biorremediación artesanal.* La biorremediación artesanal es un diálogo de saberes donde la sabiduría de la tierra, heredada de los ancestros, se encuentra con el conocimiento técnico para sanar los suelos. Como un enfoque innovador que no pretende reemplazar las técnicas de ingeniería ambiental, esta investigación ofrece una alternativa práctica y accesible para comunidades con recursos limitados, sentando las bases de una restauración participativa.

El fundamento científico de la biorremediación reside en el aprovechamiento de los procesos metabólicos microbianos. Esta tecnología emergente utiliza organismos vivos —como plantas, algas, hongos y bacterias— para absorber, degradar o transformar contaminantes, logrando inactivar o atenuar su efecto en el suelo, el agua y el aire (Vandera y Koukkou, 2017). Su implementación se basa en dos estrategias principales: la bioestimulación, que consiste en añadir nutrientes o donadores de electrones (como nitrógeno, fósforo o melaza) para activar el crecimiento de microorganismos autóctonos; y la bioaumentación, que implica la adición de cepas microbianas específicas con capacidad degradativa comprobada para potenciar el proceso (Margesin y Schinner, 2001).



Figura 3. Imagen de las prácticas de quema de bosque nativo.  
Nota: Policía Nacional (2014).

Los beneficios de la biorremediación artesanal radican en la gestión de sus estrategias. Los insumos para la bioestimulación no provienen de costosos fertilizantes de síntesis química, sino de residuos orgánicos generados en las mismas parcelas: estiércol animal, melaza o panela, ceniza de fogón y restos de cosecha. De igual manera, la bioaumentación no depende de cultivos puros adquiridos en laboratorios comerciales, sino del uso de consorcios microbianos desarrollados localmente a partir de la biodiversidad del entorno

En cuanto a la aplicación de fertilizantes, una alternativa la constituye el empleo de abonos orgánicos (compost y biosólidos, entre otros) u órgano-minerales. Estos presentan parte del nitrógeno en formas orgánicas, más o menos estables, que paulatinamente se mineralizan y pasan a disposición de las plantas (Lamsfus et al., 2003). Un ejemplo paradigmático es la preparación artesanal de lactobacilos realizada por habitantes de la vereda; estos se obtienen a partir de la fermentación de leche cruda con una fuente de carbono y actúan como un potente activador biológico.

Además, se integra el conocimiento tradicional sobre el manejo de la tierra, como el concepto andino de “suelo vivo” (Chilón, 2019). Esta visión concibe el terreno no como un soporte inerte, sino como un organismo complejo que debe ser nutrido y cuidado. En esta misma línea, las prácticas de preparación de abonos orgánicos fermentados

como el “bocashi” (palabra japonesa que significa “materia orgánica fermentada”) han sido utilizadas por agricultores desde hace muchos años.

Este abono se descompone mediante un proceso aeróbico a partir de materiales de origen animal o vegetal. Su uso activa y aumenta la cantidad de microorganismos en el suelo, mejora sus características físicas y suple a las plantas con nutrimentos (Shintani et al., 2000). De igual manera, el uso de la ceniza para corregir la acidez y la siembra de plantas “rústicas” para mejorar el suelo constituyen saberes ancestrales que se alinean con los principios de la biorremediación, aportando una dimensión cultural y de sostenibilidad.

**Metodología del estudio: un camino de doble vía entre el laboratorio y la comunidad.** La investigación que sustenta este capítulo adoptó un diseño metodológico mixto de tipo explicativo secuencial (Creswell y Creswell, 2018), estructurado en la Fase I estudio experimental de laboratorio (Cuantitativa) y la Fase II acercamiento comunitario (Cualitativa-Participativa, cuyos resultados se integraron para el diseño final del protocolo.

### ***Fase I: estudio experimental de laboratorio (Cuantitativa)***

El desarrollo procedimental de esta fase contó con el apoyo técnico y académico de un programa de Biología de una Universidad Pública. El objetivo central fue caracterizar el impacto de los contaminantes sobre las propiedades fisicoquímicas y la microbiota nativa del suelo. Para ello, se recolectaron muestras en la vereda objeto de estudio, designando una porción como control (“suelo fértil”) y otra para un proceso de contaminación controlada. Esta última fue diseñada para simular el impacto de la producción de alcaloides, mediante la adición de proporciones específicas de gasolina, hexano, acetona, ácido sulfúrico y una mezcla de metales pesados (Fe, Mn, Zn y Cu) en 100 g de muestra, replicando las condiciones halladas en residuos reales.

Posteriormente, se realizaron análisis físicos (textura, densidad real y aparente, humedad gravimétrica) y químicos (pH, materia orgánica y disponibilidad de metales) en ambos tratamientos. Simultáneamente, se llevó a cabo el aislamiento microbiológico mediante la técnica de diluciones seriadas y siembra en agar nutritivo para cuantificar las Unidades Formadoras de Colonias (UFC) y determinar la diversidad de morfotipos bacterianos. Los aislamientos más abundantes fueron caracterizados macro y microscópicamente a través de la tinción de Gram y sometidos a una batería de pruebas bioquímicas para su identificación presuntiva a nivel de género, siguiendo los lineamientos del Manual de Bergey (Garrity et al., 2004).

### ***Fase II: acercamiento comunitario (Cualitativa-Participativa)***

El objetivo de esta fase fue comprender la percepción de los habitantes de la vereda del estudio respecto a la problemática ambiental, así como documentar sus saberes tradicionales en torno a la recuperación de suelos. Para el levantamiento de información, se empleó un enfoque de muestreo por conveniencia que incluyó a 12 campesinos con experiencia en cultivos de uso ilícito, a quienes se les aplicaron encuestas estructuradas. Complementariamente, se llevaron a cabo 12 entrevistas semiestructuradas a profundidad con líderes comunitarios para explorar las dimensiones sociales y técnicas del territorio.

Los instrumentos de recolección indagaron en variables socioeconómicas, arraigo territorial, percepción del grado de degradación edáfica y disposición para participar en procesos de restauración. Asimismo, se priorizaron los saberes sobre prácticas agrícolas tradicionales y el manejo del “suelo vivo”. Los datos obtenidos fueron procesados mediante estadística descriptiva para las variables cuantitativas y un análisis de contenido temático para la información cualitativa, permitiendo una triangulación efectiva con los hallazgos de la fase experimental.

**Resultados: bacterias nativas y voluntad comunitaria, la base para la restauración.** Los resultados de la investigación confirmaron el severo impacto de los contaminantes derivados del procesamiento de alcaloides sobre el suelo, al tiempo que revelaron un sólido potencial biológico y social para su restauración.

Caracterización fisicoquímica y microbiológica del suelo. Los análisis de laboratorio arrojaron diferencias significativas entre el suelo fértil y el contaminado artificialmente. Este último mostró una alteración en su textura, con una tendencia hacia fracciones arenosas debido a la adsorción de hidrocarburos en las partículas del suelo, lo cual afecta su estructura y capacidad de retención de humedad. Respecto a las propiedades químicas, se evidenció una alta disponibilidad de metales pesados (Fe, Mn y Zn) como consecuencia de su adición. Contrario a lo esperado, el suelo contaminado presentó un mayor porcentaje de materia orgánica y un pH ligeramente más ácido que el fértil; este fenómeno podría atribuirse a la complejidad de las interacciones químicas entre los contaminantes añadidos —muchos de los cuales son compuestos orgánicos— y la matriz del suelo.

Los análisis físicos revelaron variaciones significativas en las propiedades estructurales del suelo tras el proceso de contaminación. La clase textural del suelo fértil, clasificada originalmente como franco arenoso, transitó hacia una categoría de suelo de arena en la muestra intervenida. Este cambio se vio reflejado en una reducción drástica de la densidad real, que descendió de 2,45 g/mL a 1,46 g/mL, y de la densidad aparente, que pasó de 1,18 g/mL a 0,55 g/mL. Asimismo, se observó un incremento anómalo en la humedad gravimétrica, la cual aumentó del 3,7 % en el suelo fértil al 46,2 % en el contaminado. Estos resultados sugieren que la incorporación de hidrocarburos y solventes no solo altera la composición granulométrica, sino que ocupa el espacio poroso y modifica la masa volumétrica de la matriz edáfica.

Tabla 1.  
Resumen de parámetros químicos analizados para las muestras de suelo fértil y contaminado.

Parámetro	Valor en suelo contaminado	Valor en suelo fértil
pH en H <sub>2</sub> O	7,33	7,55
Carbono Orgánico	18,99%	1,68%
Disponibilidad de Hierro	45,96%	12,82%
Disponibilidad de Manganeso	4,75%	2,73%
Disponibilidad de Zinc	6,36%	0,41%
Disponibilidad de Cobre	0,20%	1,37%

Nota: elaboración propia.

Los análisis químicos (Tabla 1) evidenciaron alteraciones profundas en la composición del suelo tras la exposición a los contaminantes. Se observó una ligera acidificación del medio, con un descenso del pH de 7,55 a 7,33. El cambio más drástico se registró en el contenido de carbono orgánico, el cual aumentó de un 1,68 % en el suelo fértil a un 18,99 % en la muestra contaminada, incremento atribuible a la presencia de cadenas carbonadas provenientes de los hidrocarburos y solventes utilizados. En cuanto a la disponibilidad de metales, el suelo contaminado presentó elevaciones significativas en los niveles de hierro (45,96 %), zinc (6,36 %) y manganeso (4,75 %) en comparación con los valores de control (suelo fértil). Curiosamente, la disponibilidad de cobre fue el único parámetro que mostró una disminución, reduciéndose del 1,37 % al 0,20 %, lo que podría sugerir procesos de lixiviación o complejas interacciones de adsorción con los nuevos componentes de la matriz edáfica.

El análisis microbiológico reveló hallazgos de alta relevancia para la comprensión de la resiliencia edáfica ante el estrés químico. Inicialmente, se observó una mayor abundancia de Unidades Formadoras de

Colonias (UFC) en el suelo fértil, lo que confirma que la carga tóxica de los contaminantes actúa como un inhibidor del crecimiento bacteriano masivo. No obstante, esta reducción en la cantidad total de microorganismos no se tradujo en una pérdida de diversidad; por el contrario, el Índice de Shannon ( $H'$ ) evidenció diferencias notables a favor del suelo impactado. Mientras que el suelo fértil presentó niveles de diversidad menores (promedio de 1,49), el suelo contaminado registró valores superiores y consistentes en sus tres réplicas (2,10; 2,11 y 2,10), alcanzando un promedio de 2,10. Con un estadístico  $p_{\text{valor}} = 0,0463$ , se confirma que la perturbación derivada de la producción de clorhidrato de cocaína ejerce una presión de selección que incrementa la riqueza y equidad de morfotipos. Este fenómeno sugiere que la presencia de agentes xenobióticos alteró la dominancia de las especies originales, permitiendo el surgimiento de poblaciones oportunistas o especialistas capaces de adaptarse y proliferar en ambientes degradados, resultando en una comunidad microbiana más heterogénea y potencialmente apta para procesos de biorremediación.

Este hallazgo indica que la contaminación opera como un filtro ambiental severo: aunque elimina a las poblaciones más sensibles, favorece la proliferación de especies adaptadas a condiciones extremas y con capacidad para metabolizar sustratos xenobióticos. Bajo la premisa de que el incremento en la densidad y actividad microbiana acelera la degradación de compuestos orgánicos (Namkoong et al., 2002; Jia et al., 2023), este potencial biológico es clave para la restauración del sitio.

En total, se aislaron 22 morfotipos predominantes, de los cuales 13 fueron obtenidos del suelo contaminado. Las pruebas bioquímicas (Tabla 2) permitieron la identificación presuntiva de géneros con reconocido potencial degradador, tales como *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Klebsiella* y *Enterobacter*. Estos géneros han sido reportados ampliamente por su capacidad para degradar hidrocarburos y tolerar metales pesados (Jia et al., 2020). La presencia de estos consorcios nativos, ya adaptados a las condiciones fisicoquímicas del territorio, constituye un recurso biológico invaluable para el diseño de estrategias de bioaumentación local.

Tabla 2.  
Estimación de géneros de morfotipos en suelo contaminados.

Morfotipo (Suelo Contaminado)	Género	Morfotipo (Suelo Fértil)	Género
SCM001	Klebsiella	SFM001	Paenibacillus
SCM002	Bacillus	SFM002	Alicyclobacillus
SCM003	Bacillus	SFM003	Bacillus
SCM004	Bacillus	SFM004	Bacillus
SCM006	Clostridium	SFM006	Bacillus
SCM007	Clostridium	SFM007	Bacillus
SCM008	Pseudomonas	SFM008	Bacillus
SCM009	Klebsiella	SFM009	Bacillus
SCM010	Pseudomonas		
SCM011	Pseudomonas		
SCM012	Enterobacter		
SCM013	Klebsiella		

Nota: elaboración propia.

El análisis de las encuestas y entrevistas reveló una comunidad con un conocimiento profundo y empírico de su territorio. Respecto al impacto ambiental, el 83% de los participantes calificó la afectación del suelo como “Alta” o “Muy Alta”, describiendo fenómenos de erosión y “quemazón” de la tierra. Este deterioro está intrínsecamente ligado a la deforestación necesaria para el establecimiento de cultivos, proceso que no solo elimina la información genética actual, sino que anula la posibilidad de especiaciones futuras y altera los ciclos hidrológicos y biogeoquímicos, dejando el suelo vulnerable a la degradación (Dalling y Tanner, 1995).

Desde la perspectiva socioeconómica, existe una conciencia unánime (100%) entre los campesinos de que la falta de oportunidades y el desempleo estructural constituyen la base de la persistencia de los cultivos de uso ilícito. Si bien la transición hacia economías legales es reconocida como un motor para la paz y la estabilidad.

**Propuesta de protocolo: integrando ciencia y saberes para la acción diagrama de flujo.** Como producto de la integración de los hallazgos de laboratorio y el diálogo comunitario, se diseñó un Protocolo de Restauración Sostenible (Figura 4). Este protocolo está concebido como una guía práctica, paso a paso, para que una familia campesina pueda iniciar la recuperación de una pequeña parcela de 5 m<sup>2</sup> de suelo contaminado.

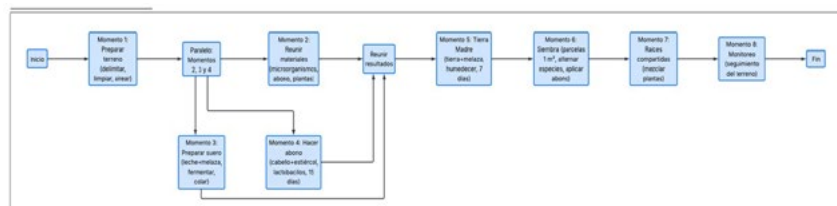


Figura 4. Protocolo de Restauración Sostenible.

Nota: elaboración propia.

El protocolo, lejos de ser un recetario rígido, se presenta como una herramienta flexible, que se nutre del intercambio de saberes. Se enfatiza la importancia del trabajo comunitario (mingas). La Minga, es una reunión de diversos actores, saberes y herramientas en busca de un objetivo común, es el encuentro donde circula la palabra, se piensa y se construye entorno al buen vivir.

## Discusión y conclusiones

La presente investigación muestra la factibilidad técnica y social de diseñar estrategias de biorremediación adaptadas a las condiciones socioeconómicas y ambientales de la vereda que hizo parte del estudio. El análisis de la diversidad bacteriana, sustentado en el Índice de Shannon, confirma la existencia de un potencial metabólico intrínseco en los suelos perturbados, lo cual valida la implementación de técnicas de bioestimulación y el aprovechamiento de consorcios nativos para la bioaugmentación. La identificación presuntiva de géneros con alta versatilidad metabólica, tales como *Pseudomonas* y *Bacillus*, refuerza esta premisa, coincidiendo con reportes previos que señalan cómo la

contaminación por hidrocarburos y xenobióticos actúa como un factor de selección que enriquece poblaciones microbianas capaces de utilizar estos compuestos como fuente de carbono y energía (Acuña et al., 2008; Rodríguez-González et al., 2022). En suma, el territorio no solo alberga la problemática, sino también los recursos biológicos necesarios para su propia restauración.

El componente social de este estudio resultó ser tan determinante como el rigor técnico de la fase experimental. La elevada percepción del daño ambiental y la disposición mayoritaria de la comunidad a participar en procesos de restauración revelan que los habitantes locales no son agentes pasivos, sino aliados estratégicos e indispensables para cualquier intervención biotecnológica. No obstante, la condición de no abandonar el cultivo de coca de manera inmediata, sumada al temor por la discontinuidad institucional y la persistencia de la violencia, evidencian las limitaciones de un enfoque puramente ambientalista.

En este contexto, la restauración del suelo no puede desligarse de la urgencia de generar alternativas económicas viables y sostenibles, ni del imperativo de garantizar condiciones de seguridad que permitan el trabajo de campo. Este hallazgo converge con la literatura sobre desarrollo alternativo, la cual subraya que cualquier transición duradera fuera de las economías ilícitas requiere abordar primero las causas estructurales de la pobreza y la exclusión (Bernex, 2009). Por lo tanto, el éxito de la biorremediación en estos escenarios depende de su integración en un modelo de desarrollo territorial que sea tanto técnica como socialmente pertinente.

La presente investigación sostiene que la restauración de suelos impactados por economías ilícitas en contextos rurales debe concebirse como un proceso sociotécnico. Bajo esta perspectiva, el territorio no es un escenario inerte, sino un “conjunto de lugares donde se despliega la historia” (Massey, 2008); por tanto, el protocolo de biorremediación artesanal desarrollado trasciende el manual de instrucciones técnicas para constituirse en una herramienta de empoderamiento comunitario.

Este enfoque busca integrar el conocimiento local en un camino pragmático que permita iniciar la sanación del entorno. Al apropiarse del territorio —donde se distribuyen los marcos que orientan las prácticas sociales—, cada grupo teje y fortalece sus lazos de identidad (Haesbaert, 2020). En consecuencia, estas territorialidades activas superan la lógica estatal moderna y sus escalas convencionales, expandiéndose a través de entramados vinculados a las luchas sociales y la defensa de los bienes comunes (Balmaceda y Deon, 2022). Así, la biorremediación se posiciona no solo como una técnica de descontaminación, sino como un acto de resistencia y cuidado del patrimonio colectivo.

### Limitaciones y perspectivas futuras

Si bien el protocolo de biorremediación propuesto surge de una rigurosa fase de experimentación controlada y un diagnóstico social situado, las complejas condiciones de seguridad del territorio impidieron su validación técnica *in situ*. No obstante, esta limitación define la relevancia del presente estudio de caso como la base científica indispensable para una fase de implementación piloto. En este sentido, la ruta lógica de esta investigación requiere la puesta en marcha de proyectos en el territorio que cuenten con un sólido respaldo institucional y un plan de monitoreo participativo; esto permitiría no solo ajustar las variables operativas, sino validar la efectividad del protocolo en condiciones de campo reales bajo la supervisión de la propia comunidad.

Las líneas de investigación derivadas de este trabajo apuntan a dos horizontes complementarios: por un lado, la caracterización genética profunda de los microorganismos aislados para optimizar el diseño de consorcios bacterianos especializados; y por otro, la integración de estas biotecnologías con programas de sustitución de cultivos de uso ilícito. Solo mediante el acoplamiento de la recuperación edáfica con alternativas económicas sólidas, se podrá garantizar una transición sostenible y digna para las familias campesinas del suroeste colombiano.

## Agradecimientos

El equipo de investigación agradece a la Universidad de Nariño los espacios para la investigación. El presente trabajo se enmarca en la línea de investigación que articula el estudio de las ciencias ambientales, la diversidad cultural y el territorio, con el propósito de abordar problemáticas socioambientales complejas desde un enfoque interdisciplinario y contextualizado en el grupo de investigación ciencias naturales, tecnología y su didáctica. En lo personal, el primer autor dedica este trabajo a Emilio: la esperanza. Asimismo, la segunda autora manifiesta que encontró su inspiración en el amor más bonito de su vida, su hijo Santiago.

## Referencias

- Acuña, A. J., Pucci, O. H., & Pucci, G. N. (2008). Caracterización de un proceso de biorremediación de hidrocarburos en deficiencia de nitrógeno en un suelo de Patagonia Argentina. *Ecosistemas*, 17(2), 85–93.
- Balmaceda, A., & Deon, J. (2022). *Sanar con la tierra: Experiencias de salud comunitaria y educación ambiental*. Editorial de la Universidad Nacional de Córdoba.
- Bernex, N. (2009). El impacto del narcotráfico en el medio ambiente. Los cultivos ilícitos de coca: Un crimen contra los ecosistemas y la sociedad. En *El mapa del narcotráfico en el Perú* (pp. 83–98). Pontificia Universidad Católica del Perú; Congreso de la República del Perú.
- Chilón Camacho, E. (2019). Etnobiotecnología andina y la alimentación ancestral del “suelo vivo”. *Etnobiología*, 17(3), 32–48.
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2018). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches*. SAGE Publications.
- Dalling, J. W., & Tanner, E. V. J. (1995). An experimental study of regeneration on landslides in montane rain forest in Jamaica. *Journal of Ecology*, 83(1), 55–64. <https://doi.org/10.2307/2261150>
- Fu, R., Wen, D., Xia, X., Zhang, W., & Gu, Y. (2017). Electrokinetic remediation of chromium (Cr)-contaminated soil with citric acid (CA) and polyaspartic acid (PASP) as electrolytes. *Chemical Engineering Journal*, 316, 601–608. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.01.092>
- Garrity, G. M., Bell, J. A., & Lilburn, T. G. (2004). *Taxonomic outline of the prokaryotes: Bergey's manual of systematic bacteriology*. Springer-Verlag.
- Guevara, E. (2003). *El hombre y su ambiente*. Ediciones Universidad de Carabobo.

- Haesbaert, R. (2020). Del cuerpo-territorio al territorio-cuerpo (de la tierra): Contribuciones decoloniales. *Cultura y Representaciones Sociales*, 15(29), 267–301.
- International Crisis Group. (2021). *Raíces profundas: Coca, erradicación y violencia en Colombia* (Informe sobre América Latina N.º 87).
- Jia, W., Cheng, L., Tan, Q., Liu, Y., Dou, J., Yang, K., Yang, Q., Wang, S., Li, J., Niu, G., Zheng, L., & Ding, A. (2023). Response of the soil microbial community to petroleum hydrocarbon stress shows a threshold effect: Research on aged realistic contaminated fields. *Frontiers in Microbiology*, 14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1188229>
- Lasa, B., Aparicio Tejo, P. M., Lamsfus Arrien, C., & Irigoyen Iriarte, I. (2003). Implicaciones ecofisiológicas y agronómicas de la nutrición nitrogenada. En A. M. Sánchez Moreiras, M. J. Reigosa Roger, & N. Pedrol Bonjoch, (coords.). *La ecofisiología vegetal: Una ciencia de síntesis* (pp. 361–386). Ediciones Paraninfo.
- Margesin, R., & Schinner, F. (2001). Bioremediation (natural attenuation and biostimulation) of diesel-oil-contaminated soil in an alpine glacier skiing area. *Applied and Environmental Microbiology*, 67(7), 3127–3133. <https://doi.org/10.1128/AEM.67.7.3127-3133.2001>
- Massey, D. (2008). Geometrías internacionales del poder y la política de una «ciudad global»: Pensamientos desde Londres. *Cuadernos del Cendes*, 25(68), 117–124.
- Namkoong, W., Hwang, E.-Y., Park, J.-S., & Choi, J.-Y. (2002). Bioremediation of diesel-contaminated soil with composting. *Environmental Pollution*, 119(1), 23–31. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00328-1](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00328-1)
- Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC) & Gobierno de Colombia. (2024). *Monitoreo de territorios con presencia de cultivos de coca 2023: Resumen ejecutivo*.

- Organización Nacional Indígena de Colombia. (2021, 17 de mayo). La Minga Indígena es un acto de vida y paz. *ONIC: Organización Nacional Indígena de Colombia*. <https://n9.cl/e2bkz>
- Policía Nacional de Colombia. (2014). *Coca: Deforestación, contaminación y pobreza: Acercamiento a la actividad agronómica y la problemática ambiental de los cultivos de coca en Colombia*. Dirección de Antinarcóticos.
- Rodríguez-Gonzales, A., Zárate-Villarroe, S. G., & Bastida-Codina, A. (2022). Biodiversidad bacteriana presente en suelos contaminados con hidrocarburos para realizar biorremediación. *Revista de Ciencias Ambientales*, 56(1), 178–208. <https://doi.org/10.15359/rca.56-1.9>
- Sharma, J., Kumar, N., Singh, N. P., & Santal, A. R. (2023). Phytoremediation technologies and their mechanism for removal of heavy metal from contaminated soil: An approach for a sustainable environment. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1076876>
- Shintani, M., Leblanc, H. A., & Tabora, P. (2000). *Bokashi: Abono orgánico fermentado; Tecnología tradicional adaptada para una agricultura sostenible y un manejo de desechos modernos*. Escuela de Agricultura de la Región Tropical Húmeda.
- Vandera, E., & Koukkou, A.-I. (2017). Bacterial community response to hydrocarbon contamination in soils and marine sediments: A critical review of case studies. En C. Cravo-Laureau, C. Cagnon, B. Lauga, & R. Duran, (eds.). *Microbial ecotoxicology* (pp. 185–226). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-61795-4\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-61795-4_9)
- Vidali, M. (2001). Bioremediation: An overview. *Pure and Applied Chemistry*, 73(7), 1163–1172. <https://doi.org/10.1351/pac200173071163>

**Luis Andrés Rodríguez Coral**

Universidad de Nariño | San Juan de Pasto | Nariño | Colombia

<https://orcid.org/0009-0000-1794-5033>

larodriguez@udenar.edu.co

Licenciado en Educación Básica con énfasis en Ciencias Naturales y Educación Ambiental, Especialista en Gestión Ambiental, Magíster en Ingeniería Ambiental, Magíster en Educación con énfasis en Interculturalidad y Doctorando en Ciencias de la Educación Universidad Pedagógica Experimental el Libertador.

**María Lorcy Rosero Mora**

Universidad de Nariño | San Juan de Pasto | Nariño | Colombia

<https://orcid.org/0009-0002-8534-3557>

mlorcy@udenar.edu.co

lorcym@hotmail.com

Investigadora Junior en MinCiencias en la Facultad de Educación de la Universidad de Nariño. Doctoranda en Ciencias de la Educación Universidad Pedagógica Experimental el Libertador. Magíster en Educación, Especialista en Administración Educativa y Licenciada en Informática.

**Oscar Jardey Suarez**

Universidad de Nariño | San Juan de Pasto | Nariño | Colombia

<https://orcid.org/0000-0001-8780-595X>

osuardez@udenar.edu.co

oscar.jardey.suarez@gmail.com

Doctor en Educación y Doctor en Ciencias, Magíster en Teleinformática, Especialista en Ingeniería de Software, Licenciado en Física. Investigador Senior. Líneas de investigación física educativa, educación en ciencias, formación de maestros, enfoque STEM+, diversidad cultural y tópicos generales de la educación.

### **Artisanal Bioremediation in Soils Contaminated by Cocaine Production in a Rural Village of Nariño, Colombia**

#### Abstract

This chapter describes the design of a small-scale bioremediation protocol for soils contaminated by cocaine hydrochloride production in a rural community in Nariño, Colombia. The text is situated within the context of the environmental crisis generated by illicit crops, which cause deforestation, biodiversity loss, soil acidification, and chemical contamination in regions of high socioeconomic vulnerability. The aim is to integrate scientific knowledge about bioremediation with the community's ancestral knowledge to develop a sustainable and low-cost solution. The research, employing a mixed-methods and experimental approach, presents a laboratory study in which samples of fertile soil were contaminated with chemical substances representative of the cocaine production process. Subsequently, the physicochemical characterization of the soils was performed, along with the isolation and identification of bacterial morphotypes in contaminated and uncontaminated samples. Simultaneously, surveys and interviews were conducted with farmers cultivating coca leaves and community leaders to gather information on

their environmental perceptions, traditional practices, and willingness to participate in restoration projects. The results form the basis for the participatory development of a restoration protocol that utilizes local resources such as native microorganisms, manure, human hair, and plants with phytoremediation capacity, with the aim of restoring soil fertility and promoting the transition to sustainable agricultural practices.

Keywords: Artisanal bioremediation; soil contamination; cocaine hydrochloride; alternative crops; sustainable rural development.

### **Biorremediação Artesanal em Solos Contaminados pela Produção de Cocaína em uma Comunidade Rural de Nariño, Colômbia**

#### Resumo

Este capítulo descreve o desenho de um protocolo de biorremediação artesanal para solos contaminados pela produção de cloridrato de cocaína em uma comunidade rural de Nariño, Colômbia. O texto situa-se no marco da crise ambiental gerada pelos cultivos ilícitos, causando desmatamento, perda de biodiversidade, acidificação dos solos e contaminação química em regiões de alta vulnerabilidade socioeconômica. O propósito é integrar o conhecimento científico sobre biorremediação com os saberes ancestrais da comunidade para desenvolver uma solução sustentável e de baixo custo. A pesquisa, com abordagem metodológica mista e experimental, apresenta um estudo de laboratório no qual amostras de solo fértil foram contaminadas com substâncias químicas representativas do processo de produção de cocaína. Posteriormente, realizou-se a caracterização físico-química dos solos e o isolamento e identificação dos morfotipos bacterianos em amostras contaminadas e não contaminadas. Paralelamente, foram aplicados questionários e entrevistas a camponeses que se dedicavam ao cultivo de folha de coca e líderes comunitários para coletar informações sobre suas percepções ambientais, práticas tradicionais e disposição para participar de projetos de restauração. Os resultados constituem a base para a construção participativa de um protocolo de restauração que utiliza recursos locais como microrganismos nativos, esterco, cabelo humano e plantas com capacidade fitorremediadora, com o objetivo de devolver a fertilidade ao solo e promover a transição para práticas agrícolas sustentáveis.

Palavras-chave: Biorremediação artesanal; contaminação do solo; cloridrato de cocaína; cultivos alternativos; desenvolvimento rural sustentável.